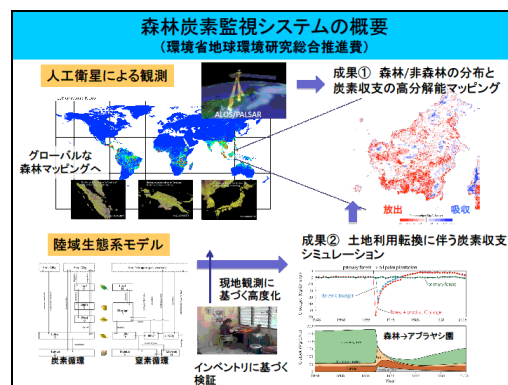
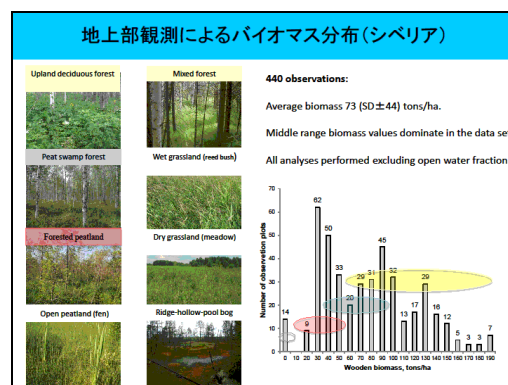
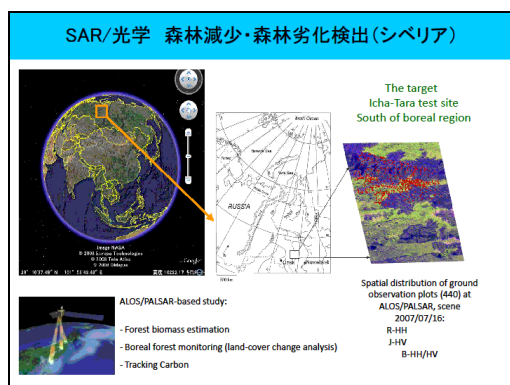


「リモートセンシングとプロセスベースモデルを用いた森林炭素監視システムの開発に関する研究」

山形 与志樹（独立行政法人 国立環境研究所 地球環境研究センター）



環境省で実施した東京大学、三菱総研<sup>103</sup>、JAXA、国立環境研究所の共同研究の成果を中心に説明する。このプロジェクトでは、人工衛星による観測と陸域生態系モデル（プロセスベースモデル）を組み合わせ、現地観測に基づくインベントリのデータを用いてモデルをキャリブレーションし、リモートセンシングデータの観測と組み合わせ、土地利用転換に伴う炭素収支のシミュレーションを実施してマッピングを行ってきた。



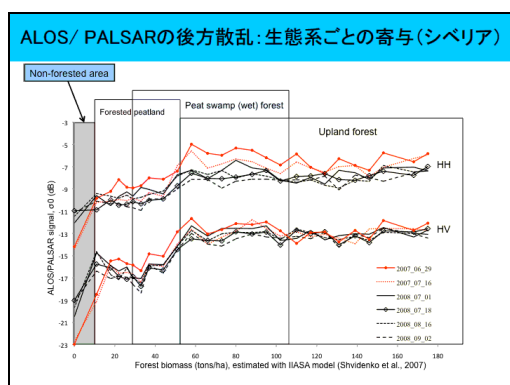
最終的な目的はグローバルな炭素循環を把握することである。今回のテーマである REDD とサイトは違うが、シベリアも含めて調査を行っている。今回、紹介するシベリアのサイトはシベリアの中央、大湿原地帯と森林地帯の境目にある。

カリマンタンとは全く違う気候帯だが、シベリアの湿原地帯も泥炭地林である。混交林

<sup>103</sup> [http://ssu.mri.co.jp/domains/earth\\_science](http://ssu.mri.co.jp/domains/earth_science)

から湿地が入ってきて、森林の下に湿地があるという形になっている。牧草地帯も一部あり、さらに湿原が入ってくる。生成されたメカニズムは違うが、中央カリマンタンに近い。完全に水が増えてくると湿原が中心になり、尾瀬や釧路湿原などと同じ高層湿原と言われており、水ゴケがある。低層湿原にはヨシやスゲが生えており、大量に広がっている。

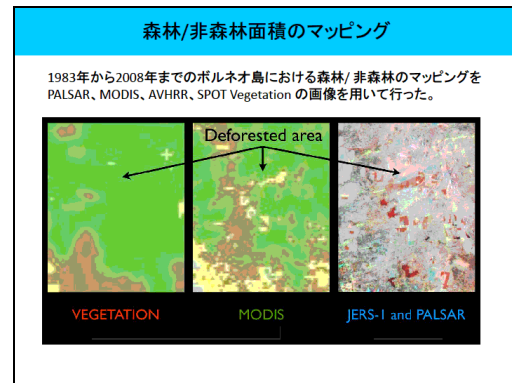
今回は八つの分類をテストサイトにし、森林だけでバイオマスがどのぐらいあるのか、現地では数百点にも及ぶサンプリング調査をした。



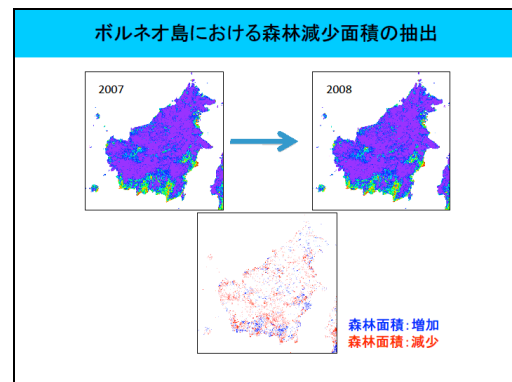
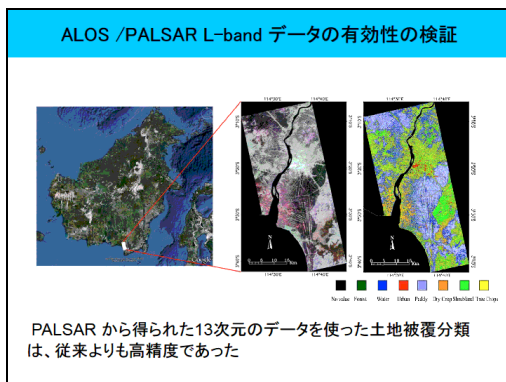
島田さんに PALSAR のデータ処理を協力いただいた。横軸にバイオマスのデータ（最大180t/ha）を取った。PALSAR には偏波というものがあるが、縦軸に ALOS の PALSAR の HV と HH を取り、いろいろなチャンネルをプロットした。

2007～2008 年までの全部で六つのシーンに対して、夏の 6～9 月に撮れた画像をプロットしてみると、やはり PALSAR は雲の影響がないので、バックscatter がデシベル (dB) 単位で安定的に観測されるため、そのあたりは非常に信頼性が高い。しかし、60t/ha ぐらいまでは反応がいいが、それ以上にバイオマスが増えても PALSAR のバックscatter はそれほど返ってこないで、この辺でサチュレーションが起きることが分かった。

もう一つの問題は、特に HH の変化が 2007 年 6 月で高く見られているが、これは森林の下に水が入っている状態の泥炭地林である。レーダが 2 回反射して、より強く戻ってくる (double bounce effect) のである。光学センサだけだと森林だけで返ってしまうが、PALSAR の L-band のような長波長の場合は、森林の下に植生や水、土壌の状態もある程度観測できる。しかし、これが泥炭地の土壌水分とどのような関係があるのかは、今回のプロジェクトでは追いつめられなかった。



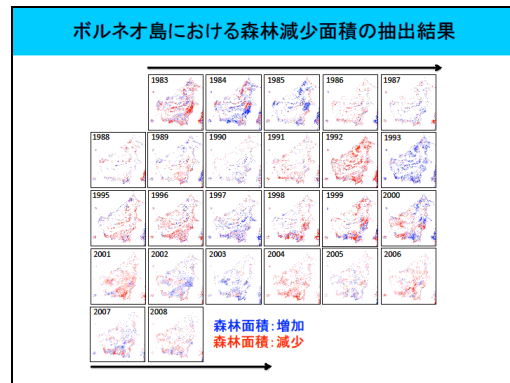
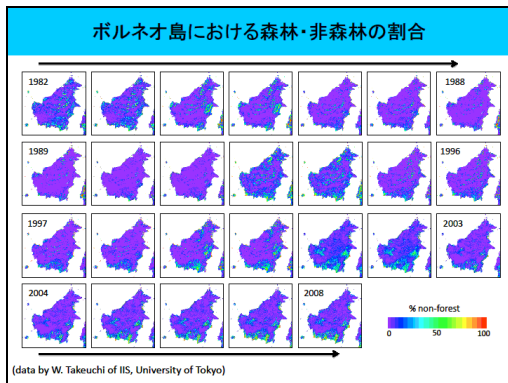
一方、ボルネオ島では、SAR のデータと MODIS のデータと SPOT Vegetation<sup>104</sup>のデータなどを組み合わせ、過去の森林減少にどのぐらいさかのぼれるかという研究を行った。



現状は、PALSAR のデータの特に多偏波の cross polarization という情報を使うと非常に正確に分類できることが分かった。

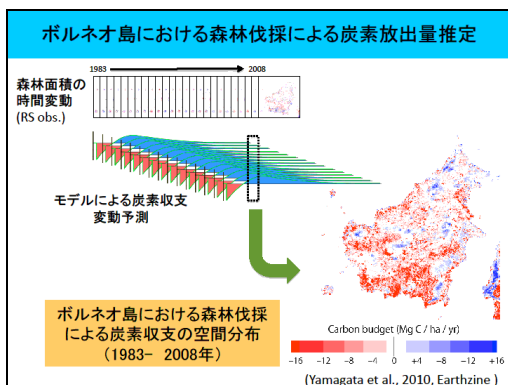
2007 年と 2008 年については SAR があるので、森林があるところを抽出し、2 年間で減ったところと増えたところの情報を作った。

<sup>104</sup> SPOT Image 社の人工衛星に搭載されているセンサ

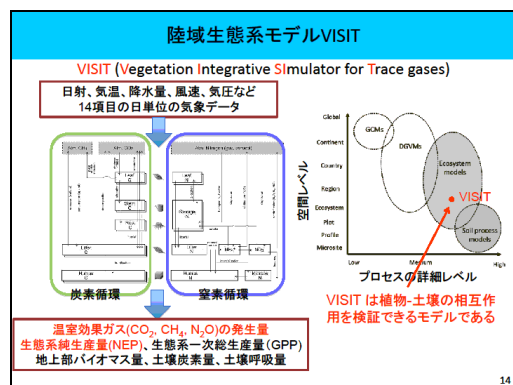
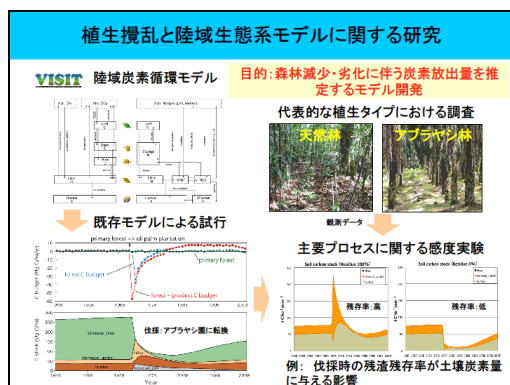


過去については SAR がないので、MODIS のデータやその他を使い、森林がどのように変化してきたか、1980 年から現在の近くまでマップを作ってみた。

しかし、MODIS やさらにそれ以前の NOAA のデータは、いくら取得頻度が高いとはいえ、雲が取れきれていないため、かなり無理のある結果なのだが、過去にさかのぼって森林と非森林、また、どこで森林が増え、どこで減ったかを測ってみた。森林がどのように攪乱を受けて、それに対する反応として成長したり、減少したりしてきたかというディスタース履歴を、地上部だけではなく地下の情報も含めてシミュレーションした。



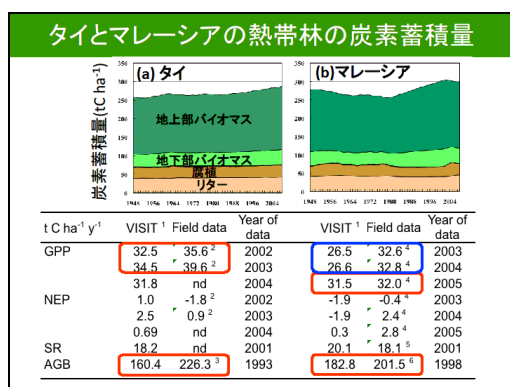
我々が見える熱帯などの森林は地上部の方がもちろん多いが、土壌からの炭素収支も無視できないので、両方を入れて評価できるモデルに、20 年以上のディスタース履歴を入れて、赤を排出、青を吸収とし、現在の炭素収支を出した。



テストサイトでより詳細な検討を行った。マレーシアでずっと観測しているサイトのモデルで、森林伐採によって天然林がアブラヤシ林に変わったところはどう変化したのか、地上部と地下部の土壌炭素の影響も含めて評価した研究である。

これを行うために我々が使っている陸域生態系モデルは、伊藤昭彦が開発した。プロセスモデルとしては、グローバルの100年あるいは1000年以上の単位で、植生変動を扱うモデルに比べれば、より細かいローカルなものまでカバーできるモデルになっており、炭素循環だけではなく、窒素循環も地上部や地下部で評価できる。

ちなみに GPP<sup>105</sup>とは光合成、NEP<sup>106</sup>とは土壌の炭素の排出を差し引いた純生態系のCO<sub>2</sub>のフラックスを表す数字である。



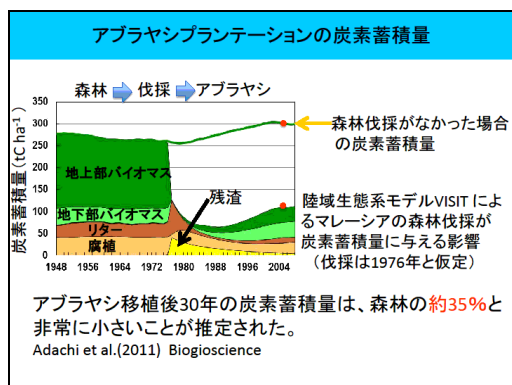
このモデルで、タイとマレーシアの地上観測のバイオマスデータと似た数字が予測されるのかを比較した。タイでは実際の地上観測で約226tのところ、モデルだと約160t。マレーシアでは約200tのところ、我々のテストサイトのVISIT<sup>107</sup>で約180tという推定

<sup>105</sup> gross primary production

<sup>106</sup> net ecosystem production

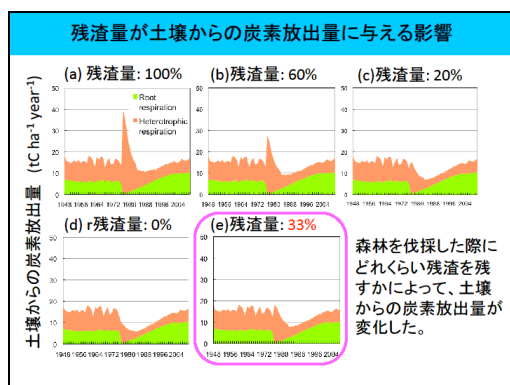
<sup>107</sup> Vegetation Integrative Simulator for Trace gases

が出た。GPP については、タイではかなり一致し、マレーシアでは 1~2 割近く実測値データの方が高くなっている。光合成は年々変動が激しいので年によって変わるが、このような精度でプロセスベースモデルでも推定できるようになっている。



1 カ月ほど前に「Biogiosciences」にアクセプトされ、チーム員の安立美奈子さんが発表<sup>108</sup>した成果だが、1976 年に伐採されたと推定されるところをサイトにして、どのような変化があるか、モデルでシミュレーションしてみた。

地上部が一気に伐採されても、全部が持ち出されるわけではなく、残渣が残るとリターになって降り積もり、それがだんだん分解していく。そこにアブラヤシが植林され、また成長していく。このような形で、1976 年から 30 年ほどたった時点でどのくらい炭素蓄積が回復するののかというシミュレーションを行うと、伐採されなかった場合の炭素蓄積量に対して、アブラヤシ園にしたとしても約 3 分の 1 しかバイオマス量は回復しなかった。



現地の情報から、約 30%の残渣が伐採後にその場所に残ると仮定しているが、実は残る量はもっと多い。熱帯林ではそれほどないかもしれないが、日本だと切り捨て間伐のよう

<sup>108</sup> <http://www.biogiosciences.net/8/2635/2011/bg-8-2635-2011.html>

に 100%残渣として残る場合もあるし、残渣量が 60%の場合、あるいは 0%の場合もある。残ったものが分解されていくスピードは、熱帯では日本よりはるかに速いが、その炭素収支はどうか。また、伐採して木が死んでも、土壌呼吸で根から炭素が出ていくので、残渣の部分と両方から排出される炭素を評価した。

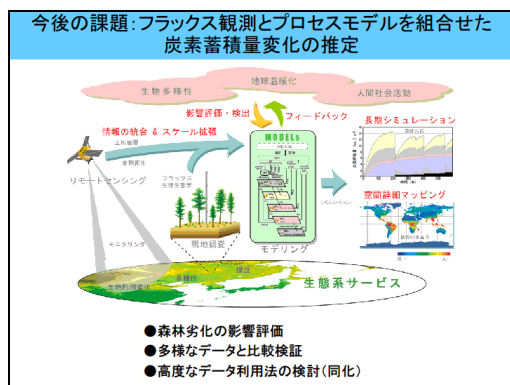
| 森林伐採による炭素放出量            |          |          |                                                                     |                    |                                                         |                                                         |                                                         |                                                         |                                                         |
|-------------------------|----------|----------|---------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Proportion remaining    |          |          | Cumulative C flux induced by land use change (tC ha <sup>-1</sup> ) |                    |                                                         |                                                         |                                                         |                                                         |                                                         |
|                         |          |          | 2-yr period (1977-1978)                                             |                    |                                                         | 10-yr period (1977-1986)                                |                                                         |                                                         |                                                         |
| Leaf (%)                | Stem (%) | Root (%) | (a) Harvest (tC ha <sup>-1</sup> )                                  | (b) 60% of Harvest | (c) SR <sup>*</sup> Total C flux (tC ha <sup>-1</sup> ) | (d) SR <sup>*</sup> Total C flux (tC ha <sup>-1</sup> ) | (e) SR <sup>*</sup> Total C flux (tC ha <sup>-1</sup> ) | (f) SR <sup>*</sup> Total C flux (tC ha <sup>-1</sup> ) | (g) SR <sup>*</sup> Total C flux (tC ha <sup>-1</sup> ) |
| 100                     | 100      | 100      | 0.0                                                                 | 0.0                | 74.4                                                    | 74.4                                                    | 209.3                                                   | 209.3                                                   | 209.3                                                   |
| 80                      | 80       | 80       | 36.9                                                                | 22.1               | 63.2                                                    | 85.3                                                    | 181.5                                                   | 218.4                                                   | 218.4                                                   |
| 60                      | 60       | 60       | 73.8                                                                | 44.3               | 52.1                                                    | 96.4                                                    | 153.8                                                   | 227.6                                                   | 227.6                                                   |
| 50                      | 50       | 50       | 92.3                                                                | 55.4               | 46.5                                                    | 101.9                                                   | 140.0                                                   | 232.3                                                   | 232.3                                                   |
| 40                      | 40       | 40       | 110.7                                                               | 66.4               | 40.9                                                    | 107.3                                                   | 126.1                                                   | 236.8                                                   | 236.8                                                   |
| 20                      | 20       | 20       | 147.7                                                               | 88.6               | 29.7                                                    | 118.3                                                   | 98.4                                                    | 246.1                                                   | 246.1                                                   |
| 0                       | 0        | 0        | 184.6                                                               | 110.8              | 18.5                                                    | 129.3                                                   | 70.7                                                    | 255.3                                                   | 255.3                                                   |
| 0                       | 40.7     | 0        | 123.6                                                               | 74.2               | 35.0                                                    | 109.2                                                   | 116.0                                                   | 239.6                                                   | 239.6                                                   |
| No disturbance (Forest) |          |          | 0.0                                                                 | 0.0                | 31.6                                                    | 31.6                                                    | 175.9                                                   | 175.9                                                   | 175.9                                                   |

Disturbance year was 1976.  
Harvest carbon was assumed to be released to the atmosphere, with 60% in 1 year and 100% in 10 years.  
\* 1977 to 1978  
\* 1977 to 1986

伐採の際の残渣量と、生態系外に持ち出されて消費された炭素を考慮に入れると、どの割合であっても森林に比べて大きな炭素の放出源になっていることが示唆された。

伐採がなかった場合、1976 年に伐採されて、30 年間でいろいろな放出が起きてきた場合、伐採した場所に 100%切り捨てて残っている場合を考えた。いろいろな研究を引用しているが、このシミュレーションは、伐採して系外に持ち出された約 60%が 1 年ほどで排出されてしまうと仮定した。10 年のうちには約 100%が結局排出される。熱帯は特に、伐採木材自身も排出されてしまう場合が多いのである。

残された土壌がどのぐらいのスピードで分解していくのか、我々のモデルで予測しているのだが、2 年後、10 年後に、残された土壌中で残渣がどれだけ分解するかを考えると、当然ながら、いずれの場合も伐採がなかった場合に比べて排出量が多い。系内に残すほど、排出量が大きくなる。熱帯の場合は 10 年ぐらいすると同じになるが、シベリアの場合は伐採して 100 年たっても 200 年たっても朽ちずに残っていることもあるので、状況は地球全体で全く違うが、そういうシミュレーションはできるようになってきた。



我々の目的は、グローバルな炭素収支あるいは炭素循環を評価することにある。REDD は地球温暖化対策になるが、今は温暖化の影響も無視できない。我々が観測しているシベリアの泥炭地林でも温暖化の影響が非常に強く出ていて、洪水がどんどん増え、湿地化が進んでいる。その影響もあって森林が減少しているが、温暖化の影響が炭素循環にどのような影響を与えるかというフィードバックが既に始まりかけているかもしれないと言われており、今後ますます深刻化が見込まれる。すると、森林全体が吸収源ではなく排出源になる可能性も議論されている。そういう長期シミュレーションが、我々のプロセスベースモデルがあるとできるようになる。

しかし、現地のデータはごく限られたものしかない。今回、REDD でデータがどんどん取れるようになると我々のシミュレーションも進化していけるが、土壌をきちんと評価する観測はまだない。特に泥炭地林は観測が非常に難しいということを考えると、やはり炭素フラックスを測り、それを使ってモデルをキャリブレーションして、炭素収支を出していくことが、グローバルな視点からは非常に重要になる。

REDD では、土壌中の炭素収支がどのぐらい議論に入っているか分からないが、今日、紹介したような形で、決して無視できない排出はあるだろう。また、一斉に皆伐した場合は観測に乗るが、森林劣化はそれが難しいので、劣化の評価をどう行っていくかが今後の課題である。